رسوب‌دهی الکتروشیمیایی پوشش نانوماده‌ی مرکب نیکل- نیترید تیتانیم با استفاده از جریان مستقیم*

نفیسه پرهیزکار[۱]		ابوالقاسم دولتی[۲]		رویا آقابابازاده[۳]

چکیده

پوشش نیکل، خواص مکانیکی ضعیفی از خود نشان می‌دهد. به‌منظور بهبود این خواص، نیکل به‌همراه ذرات سرامیکی پوشش داده می‌شود. در این پژوهش، پوشش Ni/TiN با استفاده از حمّام واتس حاوی نانوذرات TiN ایجاد شد و اثر چگالی جریان رسوب‌دهی، سرعت تلاطم الکترولیت و میزان ذرات در محلول بررسی شد. میزان حضور نانوذرات TiN در پوشش، به‌کمک آزمون EDS تعیین و مُرفولوژی پوشش‌ها توسط میکروسکُپ الکترونی روبشی بررسی شد. خوردگی نمونه‌ها، با استفاده از روش پلاریزاسیون خطی ارزیابی شد. نتایج نشان دادند که در چگالی جریان $4\ A/dm^2$ و سرعت تلاطم 450 دور در دقیقه، بیش‌ترین ذرات در پوشش نانوماده‌ی مرکب به‌دام می‌افتند.

واژه‌های کلیدی رسوب‌دهی الکتروشیمیایی، نانوماده‌ی مرکب، نیترید تیتانیم.

Electrochemical Deposition of Ni/TiN Nanocomposite Coating by Direct Current

N. Parhizkar		A. Dolati		R. Aghababazade

Abstract

Nickel coating has a poor surface mechanical properties. In order to improve the mechanical properties, nickel were covered with ceramic particles. In this study, the Ni/TiN composite coatings were produced by Watts bath containing TiN nanoparticles. The effects of deposition current density, electrolyte agitation speed and the number of particles were investigated. The presence of particles was determined by EDS analysis and the coating morphology was examined by SEM. The corrosion samples were examined by linear polarization tests. It was observed that the maximum amount of particles is formed at the current density of $4\ A/dm^2$ and the agitation speed of 450 rpm.

Key Word Electrochemical Deposition, Nanocomposite, Titanium nitride.

---

* نسخه‌ی نخست مقاله در تاریخ ۹۲/۱/۱۵ و نسخه‌ی پایانی آن در تاریخ ۹۳/٤/۱۱ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده مسئول: فارغ التحصیل کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف.

(۲) استاد، عضو هیات علمی دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف.

(۳) استادیار، عضو هیأت علمی پژوهشگاه علوم و فناوری رنگ تهران.

مقدمه

نانومواد مرکب زمینه فلزی متشکّل از ذرات بسیار ریز فلزات خالص، سرامیک‌ها و مواد آلی در یک زمینه‌ی فلزی هستند [1]. این ذرات برای بهبود ویژگی‌های مکانیکی نانومواد مرکب از قبیل سختی و سایش سطح پوشش، استفاده می‌شوند [2]. روش‌های مختلفی برای توسعه‌ی نانومواد مرکب زمینه فلزی استفاده شده‌اند. از میان آن‌ها، فرایند رسوب‌دهی الکتروشیمیایی هم‌زمان (فرایند تلفیق ذرات حین نشست الکترولیتی فلز) مزیت‌هایی از قبیل تشکیل رسوبات یکنواخت روی زیرلایه با شکل‌های پیچیده، هزینه‌ی کم، تکرارپذیری خوب و کاهش ضایعات را دارد [3]. زمینه‌ی فلزی به‌کار رفته در این فرایند، فلزات و آلیاژهای نیکل، مس، کروم، کبالت، آهن، طلا، روی، سرب و ماده‌ی مورد استفاده برای ذرات فاز ثانویه، ترکیبات فلزی و سرامیکی هستند. نیکل به‌عنوان یک ماده‌ی مهندسی، عمدتاً به‌عنوان زمینه‌ی فلزی استفاده شده است [4]. رسوب‌دهی نیکل به‌روش آب‌کاری الکتریکی، بسیار متداول است، زیرا پوشش نیکل ویژگی‌های مکانیکی خوب، مقاومت به خوردگی عالی، رسانایی الکتریکی بالا، هدایت حرارتی خوب و خاصیت مغناطیسی مطلوبی از خود ارائه می‌دهد [5].

امروزه، مواد مرکب Ni-SiC به‌صورت تجاری برای حفاظت از قطعات اصطکاکی، موتورهای احتراق و قالب‌های ریخته‌گری استفاده شده‌اند [4]. با این‌حال، رسوب‌دهی هم‌زمان نیکل با نانوذرات دیگر مانند Si_3N_4، TiN و TiC که از مواد با خواص خوب سایشی هستند و آرایش فضایی شبیه به SiC دارند، کم‌تر گزارش شده است. نانوذرات TiN، مقاومت به خوردگی، هدایت حرارتی و رسانایی الکتریکی خوبی دارند. در ضمن، TiN سختی بالایی دارد و می‌تواند به‌عنوان فاز ثانویه برای بالا بردن استحکام و سختی زیرلایه‌ی فلزی یا سرامیکی استفاده شود. بنابراین، نانوذرات TiN یک جنبه‌ی خوب کاربردی به‌عنوان افزودنی دارند [6]. میزان نانوذرات در زمینه‌ی فلزی، وابسته به بسیاری از متغیّرهای فرایند شامل مشخصات ذره (بار سطحی، نوع، شکل و اندازه)، ترکیب الکترولیت (غلظت الکترولیت، افزودنی‌ها، دما، pH، غلظت و نوع عوامل سطحی)، چگالی جریان (جریان مستقیم، جریان پالس، زمان پالس، چرخه‌ی کار)، هیدرودینامیک (جریان آرام، متلاطم و مختلط) و هندسه‌ی الکترود (الکترود دیسک چرخان، الکترود سیلندر چرخان، الکترود صفحه‌ای موازی و مانند آن) می‌باشد. ترکیب الکترولیت، عاملی مهم و مؤثر در فرایند رسوب‌دهی هم‌زمان می‌باشد، اگرچه اغلب تصویر واضحی از اثر دقیق عوامل آزمایشگاهی مشکل به‌دست می‌آید. بیش‌تر پژوهش‌های انجام شده‌ی اخیر پیشنهاد کرده‌اند که فرایند رسوب‌دهی هم‌زمان تحت تأثیر سه عامل کلی می‌باشد؛ ۱) چگالی جریان اعمالی، ۲) نوع و غلظت ذرات و ۳) تلاطم حمّام یا حرکت الکترود [7].

مواد و روش تحقیق

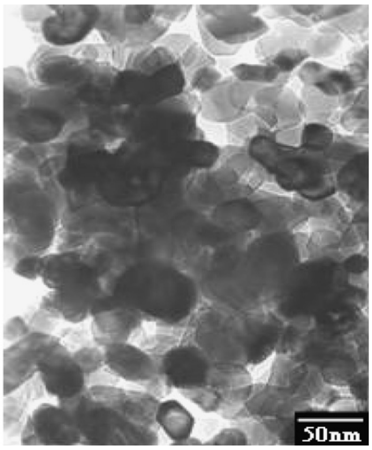
در این پژوهش، از حمّام واتس برای آب‌کاری پوشش‌های نیکل خالص و مواد مرکب نیکل- نیترید تیتانیوم استفاده شد. ترکیب شیمیایی حمّام مورد استفاده و شرایط آب‌کاری نمونه‌ها، در جدول (۱) آورده شده است. زیرلایه (کاتد) از جنس ورق مس به‌ضخامت ۱ میلی‌متر و طول و عرض به‌ترتیب ۵ و ۱ سانتی‌متر انتخاب شد. سطح پوشش‌دهی، ۱ سانتی‌متر مربع انتخاب شد و برای محدود کردن ابعاد نمونه، از چسب عایق برق استفاده شد. در بررسی‌های الکتروشیمیایی، از ورق پلاتین به‌ابعاد ۱/۵ × ۲ سانتی‌متر مربع به‌عنوان آند برای پوشش‌دهی و از فولاد زنگ نزن ۳۱۶ به‌ابعاد ۵ × ۲ سانتی‌متر مربع، به‌عنوان الکترود کمکی استفاده شد. به‌منظور آماده سازی و خارج کردن اکسیدهای سطحی در زیرلایه‌ها، از سنباده‌های با درجه‌های به‌ترتیب ۲۴۰، ۶۰۰، ۱۰۰۰ و ۳۰۰۰ استفاده شد. چربی‌گیری به‌مدّت ۱۵ دقیقه در بشر حاوی اَستن تحت امواج فوق صوت انجام شد. پس از محدود کردن ابعاد زیرلایه توسط چسب برق، نمونه‌ها قبل از انجام پوشش‌دهی، به‌مدّت ۱۰ ثانیه در محلول اسیدشویی ($50\%V\ H_2SO_4 + 20\%V\ HNO_3 +$

($15\%V\ HCL + 10\%V\ H_2O$) قرار گرفت و سپس، دو بار با آب مقطّر شسته شدند. تلاطم مورد نیاز حین رسوب‌دهی، به‌وسیله‌ی یک دستگاه هم‌زن مغناطیسی آیکا و مغناطیس ۱ سانتی‌متری اعمال شد. قبل از انجام آب‌کاری و به‌منظور شکستن خوشه‌های تشکیل شده، محلول به‌مدّت ۳۰ دقیقه در دستگاه فوق صوت پالسی قرار گرفت.

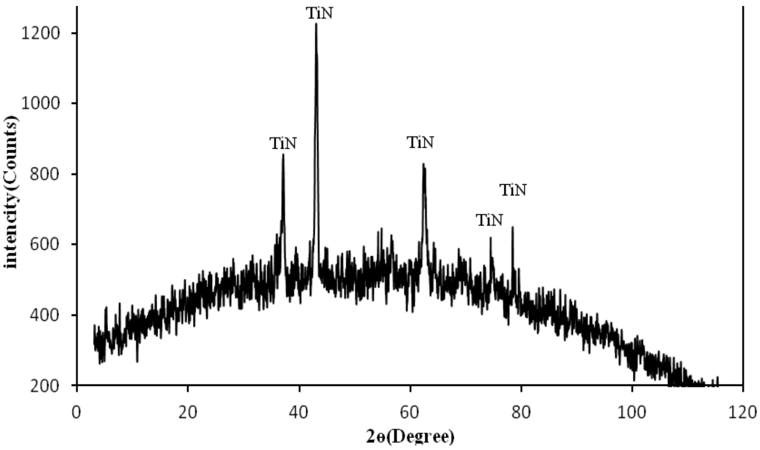
جدول ۱ ترکیب شیمیایی حمّام مورد استفاده و شرایط آب‌کاری نمونه‌ها

اجزاء و شرایط	مقدار
سولفات نیکل ($NiSO_4.6H_2O$)	240 (g/lit)
کلرید نیکل ($NiCl_4.6H_2O$)	40 (g/lit)
اسید بوریک (H_3BO_3)	30 (g/lit)
دما	50 ± 5 °C
pH	4 ± 0/2
چگالی جریان اعمالی	1 , 2 , 3 , 4 , 6 (A/dm^2)
سرعت تلاطم الکترولیت	300 , 450 , 600 , 750 (rpm)
غلظت ذرات TiN	0 , 10 , 20 , 30 (g/lit)

پودر استفاده شده در این تحقیق با میانگین اندازه‌ی دانه‌ی 40 nm و مساحت سطح ویژه‌ی 19-31 m^2/gr، در پژوهشگاه علوم و فناوری رنگ تهران تهیّه شد. تصویر میکروسکُپ الکترونی عبوری (TEM) از این ذرات در شکل (۱)، بیانگر وجود ذرات در گستره‌ی ۲۰ تا ۵۰ نانومتر می‌باشد [8]. الگوی پراش پرتوی ایکس مربوط به TiN، در شکل (۲) آورده شده است. داده‌های این الگو، با کد مرجع 00-038-1420 تطبیق داده شد. برای بررسی خواص خوردگی پوشش‌های ماده‌ی مرکب نیکل – نیترید تیتانیوم، از محلول 3/5 درصد وزنی کلرید سدیم استفاده شد. بررسی مُرفولوژی سطح نمونه‌ها، توسط میکروسکُپ الکترونی روبشی (SEM) ساخت شرکت IROST صورت گرفت. به‌منظور مطالعه‌ی ترکیب شیمیایی پوشش‌ها، از آزمون طیف‌نگاری EDS استفاده شد. روش تحلیل داده‌ها در این آزمون، تولید شرکت IROST بود که به دستگاه میکروسکُپ الکترونی روبشی متصل شده بود. در این روش، میزان نسبی عناصر نیکل و تیتانیم بررسی شدند و نتایج حاصل، به درصد حجمی Ni و TiN تبدیل شدند.



شکل ۱ تصویر TEM میدان روشن از پودر TiN [8]

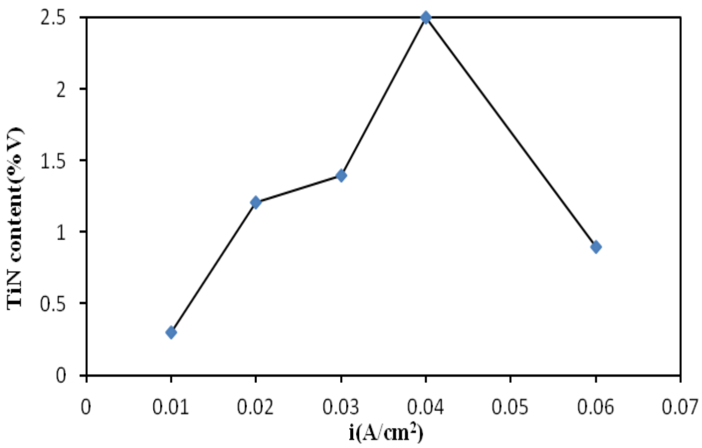


شکل ۲ الگوی پراش پرتوی ایکس از پودر TiN

نتایج و بحث

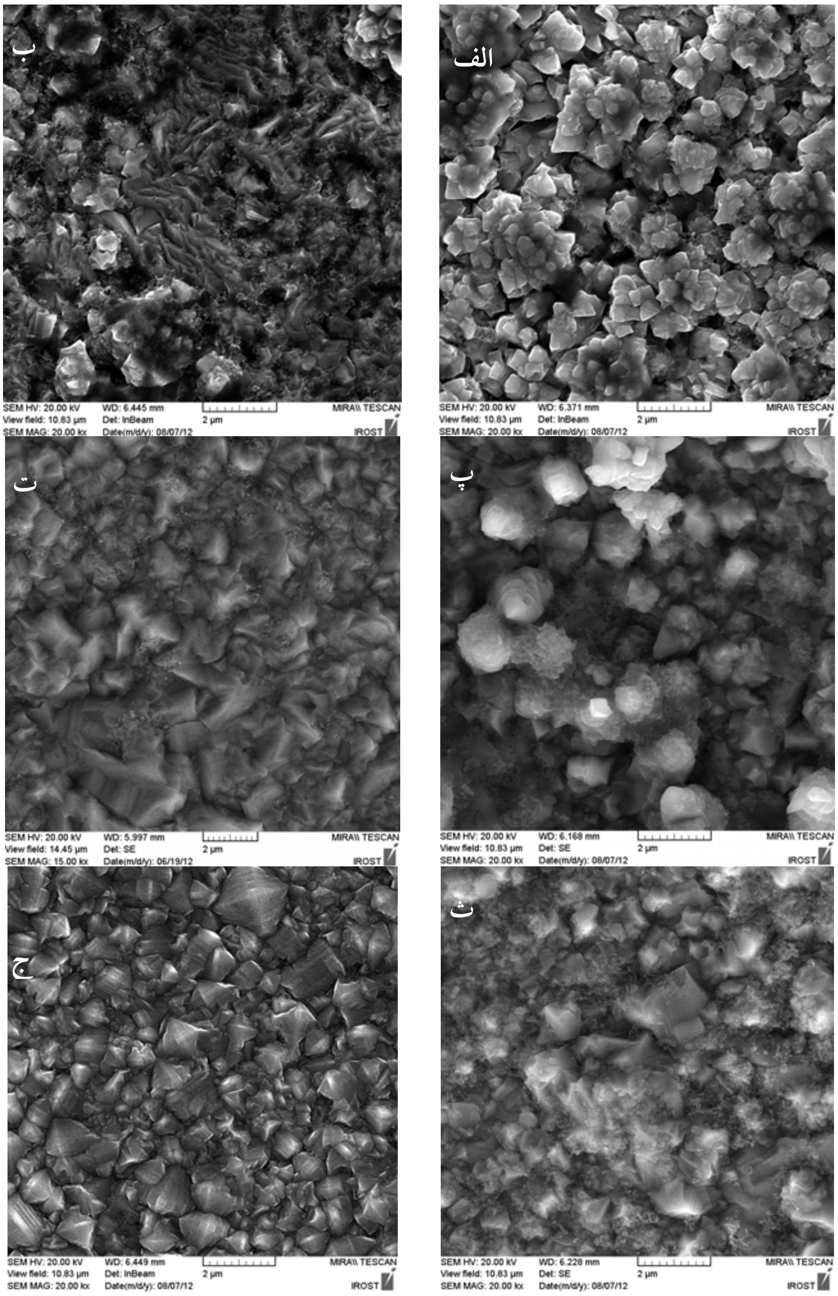
بررسی اثر چگالی جریان پوشش‌دهی

به‌منظور بررسی اثر چگالی جریان اعمالی، میزان پودر نیترید تیتانیم در حمّام 10 g/lit، سرعت تلاطم الکترولیت 450 rpm و چگالی جریان از ۱ تا 6 A/dm^2 تغییر داده شد. همان‌گونه که در شکل (۳) دیده می‌شود، با افزایش چگالی جریان اعمالی، ابتدا درصد حجمی ذرات نیترید تیتانیم در پوشش مادهی مرکب افزایش یافته است و میزان حضور ذرات در چگالی جریان ٤ A/dm^2، به بیش‌ترین مقدار خود رسیده است. با افزایش بیش‌تر چگالی جریان اعمالی، درصد حجمی ذرات نیترید تیتانیم رسوب کرده کاهش یافته است. در چگالی جریان کم‌تر از ٤ A/dm^2، افزایش میزان ذرات با افزایش چگالی جریان، در توافق با مدل گاگلمی است. مدل گاگلمی، شامل یک فرایند دو مرحله‌ای جذب بی‌قاعده و جذب قوی ذرات می‌باشد. اوّلین مرحله، جذب فیزیکی بی‌قاعده‌ی ذرات روی کاتد است که با درجه‌ی بالایی از پوشش‌دهی و بدون تخلیه‌ی یون‌های الکترواَکتیو جذب شده روی ذرات همراه است. دوّمین مرحله، جذب الکتروشیمیایی قوی ذرات است. این مرحله، به‌علّت میدان الکتروشیمیایی اعمال شده است و همراه با تخلیه‌ی یون‌های الکترواَکتیو می‌باشد [9]. معمولاً جذب قوی، مرحله‌ی کنترل کننده‌ی سرعت فرایند رسوب‌دهی الکتروشیمیایی است، زیرا نسبت به جذب بی‌قاعده، مشکل‌تر رخ می‌دهد. جذب قوی، می‌تواند از طریق ولتاژ اضافی بالا مطابق با افزایش چگالی جریان، بیش‌تر شود. در نتیجه، مقدار ذره در پوشش با افزایش چگالی جریان افزایش می‌یابد. با این‌حال، در چگالی جریان‌های بالاتر از ٤ A/dm^2، بهبود سرعت رسوب‌دهی نیکل به‌علّت افزایش چگالی جریان، بر اثر افزایش حضور ذرات غالب است و این، منجر به کاهش مقدار ذرات می‌شود. به‌عبارت دیگر، در چگالی جریان‌های بالاتر از ٤ A/dm^2، افزایش چگالی جریان افزون بر این‌که به جذب قوی و دائمی ذرات نیترید تیتانیم به درون پوشش کمک می‌کند، سرعت حرکت و رسیدن یون‌های Ni^{2+} به سطح کاتد را نیز افزایش می‌دهد و در رقابت میان یون‌های آزاد نیکل با ذرات نیترید تیتانیم، یون‌های نیکل موفق‌تر خواهند بود و میزان ذرات نیترید تیتانیم در مجاور کاتد کاهش می‌یابد.



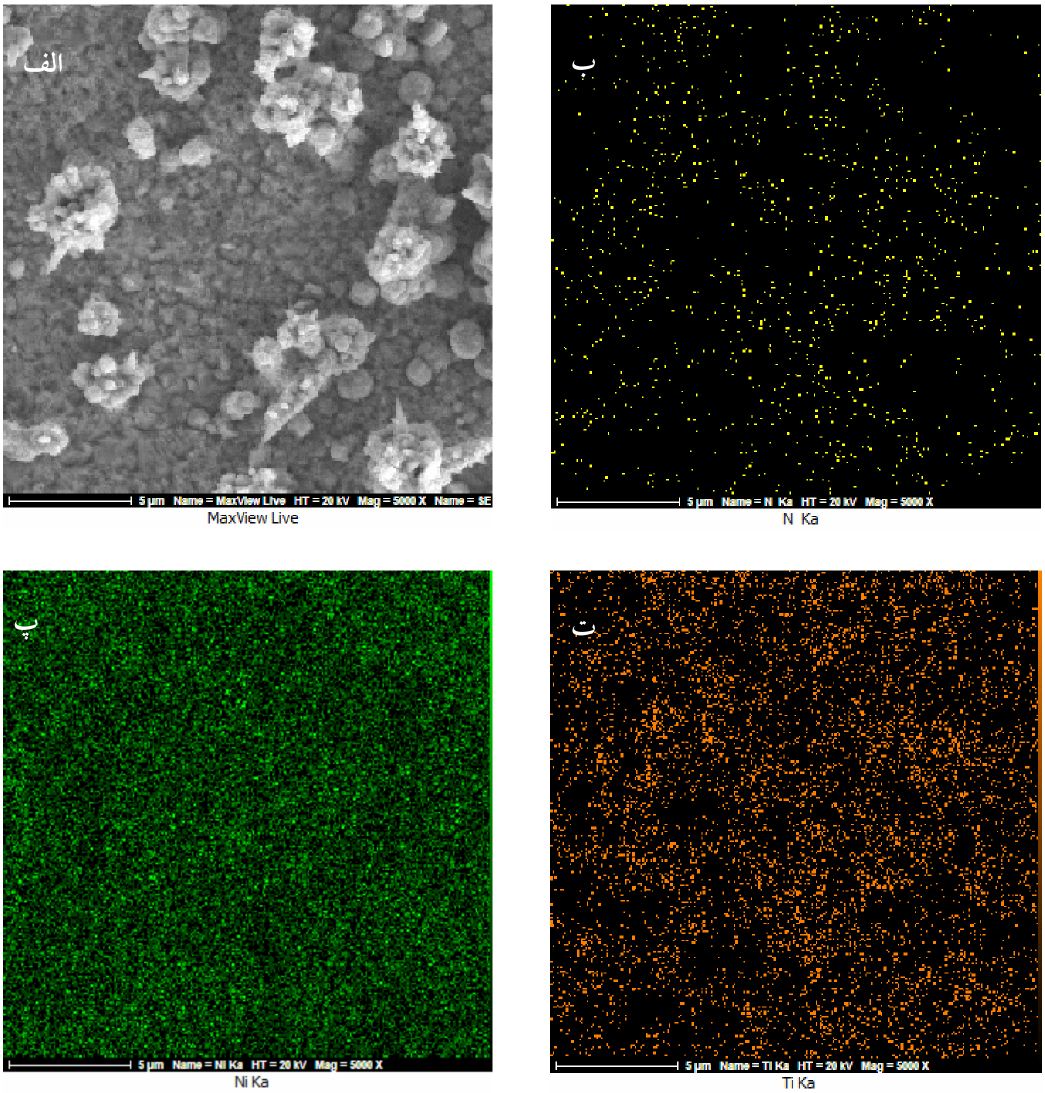
شکل ۳ درصد حجمی نانو ذرات نیترید تیتانیم در پوشش ماده‌ی مرکب بر حسب چگالی جریان اعمالی

شکل (٤)، تصویرهای میکروسکُپ الکترونی روبشی از سطح پوشش‌های مادهی مرکب در پنج چگالی جریان مختلف و تصویر پوشش نیکل خالص را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با تغییر چگالی جریان، مُرفولوژی و شکل هندسی پوشش تغییر می‌کند. افزون بر این، با افزایش چگالی جریان از ٤ A/dm^2 به ٦ A/dm^2، میزان بلورهای هرمی شکلِ کوچک‌تر، بیش‌تر شده است. این نتایج، در توافق با نظریه‌ی هسته‌زایی و رشد رسوب‌های الکتروشیمیایی است. در چگالی جریان‌های بالاتر، سرعت هسته‌زایی بالاتر است، در حالی‌که در چگالی جریان‌های پایین‌تر، رشد بیش‌تر هسته‌ها انتظار می‌رود [10].

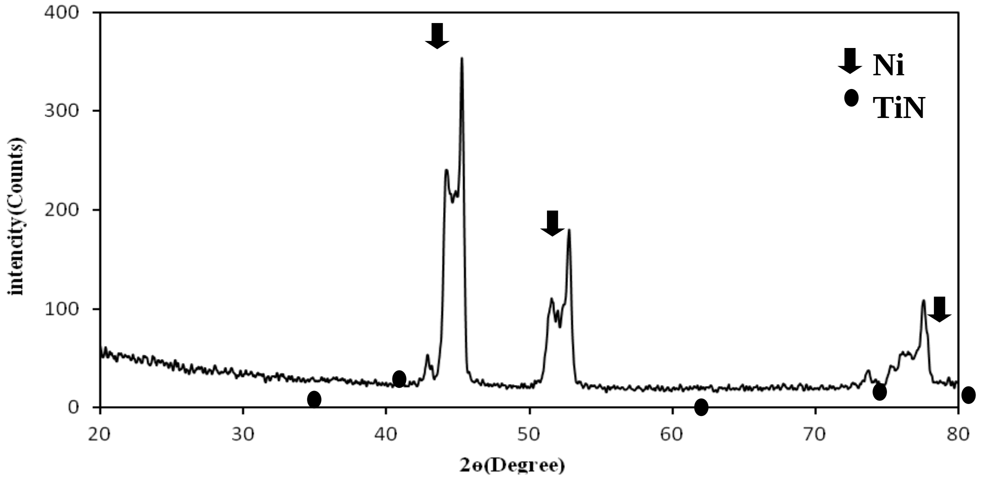


شکل ٤ تصویرهای SEM از سطح پوشش‌های ماده‌ی مرکب نیکل- نیترید تیتانیم در پنج چگالی جریان ۱ (الف)، ۲ (ب)، ۳ (پ)، ٤ (ت) و 6 A/dm^2 (ث) و پوشش نیکل خالص در چگالی ٤ A/dm^2 (ج)

شکل (۵)، نتایج تحلیل نقطه‌ای از سطح نمونه‌ی ماده‌ی مرکب نیکل – نیترید تیتانیم را در چگالی جریان و سرعت تلاطم بهینه‌ی حمّام نشان می‌دهد. آزمون پراش پرتوی ایکس در مورد این پوشش، به‌ازای مقادیر بهینه‌ی چگالی جریان و سرعت تلاطم الکترویت انجام شد. نتایج این آزمون، در شکل (٦) آورده شده است. داده‌های این آزمون، با کدهای مرجع 00-01-1266 و 00-038-1420 به‌ترتیب مربوط به نیکل و نیترید تیتانیم، تطبیق داده شد. به‌علّت درصد کم ذرات نیترید تیتانیم در پوشش، آزمون پراش پرتوی ایکس به‌خوبی قادر به شناسایی آن نیست.



شکل ۵ مُرفولوژی (الف) و نتایج آزمون نقطه‌ای برای نیتروژن (ب)، نیکل (پ) و تیتانیم (ت) از سطح نمونه‌ی ماده‌ی مرکب به‌ازای چگالی جریان $4\ A/dm^2$ و سرعت تلاطم 450 دور در دقیقه



شکل ٦ الگوی پراش پرتوی ایکس مربوط به پوشش ماده‌ی مرکب در چگالی جریان $4\ A/dm^2$، سرعت تلاطم 450 دور در دقیقه و غلظت ذرات TiN برابر با 10g/lit

بررسی اثر سرعت تلاطم الکترولیت بر پوشش‌های ماده‌ی مرکب

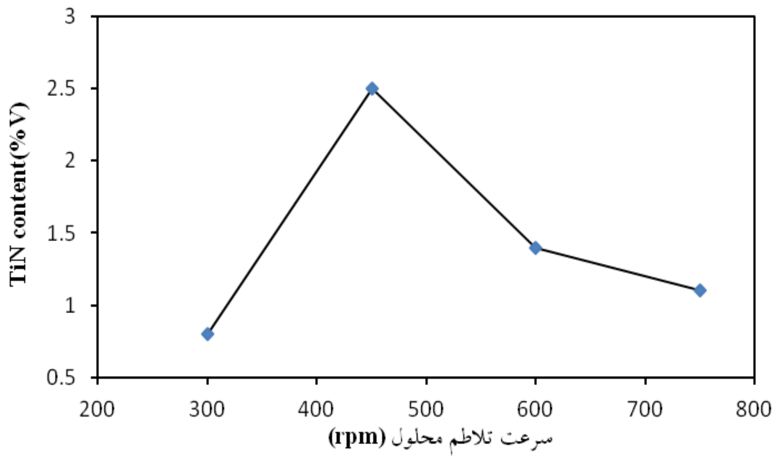
به‌منظور بررسی اثر سرعت تلاطم الکترولیت بر میزان حضور ذرات در پوشش ماده‌ی مرکب، میزان پودر نیترید تیتانیم در حمّام برابر با 10 g/lit، چگالی جریان $٤\ A/dm^2$ انتخاب و سرعت تلاطم الکترولیت از ۳۰۰ تا ۷۵۰ دور در دقیقه تغییر داده شد. شکل ۷، نتایج آزمون EDS مربوط به نمونه‌های ماده‌ی مرکب را در چهار سرعت مختلف تلاطم الکترولیت نشان می‌دهد. ایجاد تلاطم در حمّام به دو منظور انجام می‌شود: ۱- معلّق نگه‌داشتن ذرات در حمّام و ۲- رساندن ذرات به سطح کاتد. تحقیقات نشان داده‌اند که افزایش تلاطم، به‌طور کلی میزان ذرات در رسوب فلزی را افزایش می‌دهد. با این‌حال، اگر تلاطم از حدی بیش‌تر باشد، موجب کاهش حضور ذرات در زمینه‌ی فلزی می‌شود، زیرا نیروهای هیدرودینامیک قوی در الکترولیت، ذرات را قبل از به‌دام افتادن در زمینه‌ی فلزی، از سطح کاتد دور می‌کنند. در این پژوهش نیز نتایج مشابهی حاصل شد. همان‌طور که در شکل (٤) مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت تلاطم الکترولیت، ابتدا میزان نانوذرات نیترید تیتانیم در پوشش ماده‌ی مرکب افزایش یافته و در سرعت تلاطم 450 دور بر دقیقه، به بیش‌ترین میزان خود می‌رسد. پس از آن، با افزایش بیش‌تر سرعت تلاطم، میزان ذرات در پوشش ماده‌ی مرکب کاهش می‌یابد. افزایش میزان ذرات در پوشش در سرعت‌های تلاطم بیش‌تر، به‌این علّت است که با افزایش سرعت تلاطم محلول، ذرات بیش‌تری به سطح کاتد می‌رسند و مقدار ذرات به‌دام افتاده در پوششِ در حال رشد افزایش می‌یابد. امّا، در سرعت‌های تلاطم بیش‌تر از 450 دور بر دقیقه، زمان سکونت ذرات در سطح کاتد کاهش می‌یابد و ذرات فرصت پیدا نمی‌کنند تا در زمینه‌ی فلزیِ در حال رشد به‌دام بیافتند. از طرف دیگر، با افزایشِ سرعت تلاطم محلول، آن دسته از ذرات نیترید تیتانیم که به‌صورت ضعیف جذب سطح کاتد شده‌اند، در اثر بالا بودن سرعت حرکت سیّال، از سطح کاتد کنده می‌شوند و در نتیجه‌ی آن، درصد وزنی ذرات نیترید تیتانیم موجود در پوشش ماده‌ی مرکب کاهش می‌یابد [11].

بررسی اثر غلظت ذرات در الکترولیت

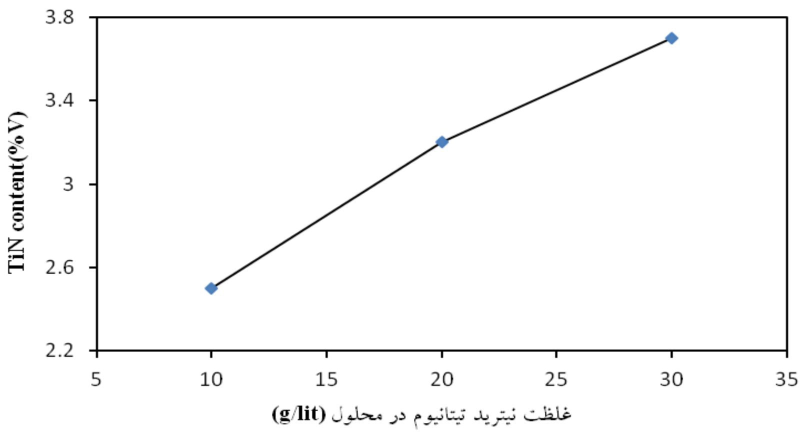
به‌منظور بررسی اثر غلظت ذرات نیترید تیتانیم درون الکترولیت، نمونه‌هایی با غلظت پودر نیترید تیتانیم برابر با ۰ ، ۱۰ ، ۲۰ و 30 گرم بر لیتر به‌ازای چگالی جریان $4\ A/dm^2$ و سرعت تلاطم 450 دور بر دقیقه تهیّه شد. با استفاده از نتایج آزمون EDS، درصد حجمی ذرات نیترید تیتانیم که درون پوشش ماده‌ی

مرکب رسوب کرده‌اند، در شکل (۸) گزارش شده است. غلظت ذرات در سوسپانسیون نیز عامل مهمی است که بر غلظت ذرات در رسوب تأثیر دارد. همان‌طور که در شکل (۸) دیده می‌شود، با افزایش غلظت ذرات در الکترولیت، میزان ذراتِ به‌دام افتاده در پوشش ماده‌ی مرکب افزایش می‌یابد. در غلظت ذرات کم در محلول، رسوب‌دهی هم‌زمان از طریق رسیدن ذرات به سطح الکترود (کاتد) محدود می‌شود و این، منجر به حضور مقدار کم ذرات در رسوب می‌شود. اگر میزان ذرات در محلول افزایش یابد، رسیدن ذرات به سطح الکترود بیش‌تر می‌شود و این، موجب افزایش میزان حضور ذرات در رسوب می‌شود.

به‌منظور بررسی تأثیر حضور و غلظت ذرات نیترید تیتانیم، از روش ولتامتری خطی در چهار حمّام واتس با غلظت‌های ذرات نیترید تیتانیم برابر با ۰ ، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ گرم بر لیتر و سرعت روبش 1 mV/sec از پتانسیل 0/6- تا 1/2- ولت استفاده شد. شکل (۹)، نمودارهای مربوطه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، حضور ذرات در الکترولیت در چگالی جریان‌های پایین، اثر زیادی بر پلاریزاسیون کاتدی ندارد، امّا وجود ذرات، پتانسیل شروع احیای یون‌های نیکل را کمی به‌سمت مقادیر مثبت منتقل کرده است. با این‌حال، در چگالی جریان‌های بالاتر و نیز، در غلظت‌های بالاتر ذرات، اثر ذرات بر پلاریزاسیون کاتدی بیش‌تر است و سرعت احیای کاتیون‌های نیکل کاهش یافته است. این کاهش سرعت احیاء، به کاهش انتقال یونی از طریق نانوذرات نیترید تیتانیم در ناحیه‌ی کنترل نفوذی نسبت داده می‌شود.

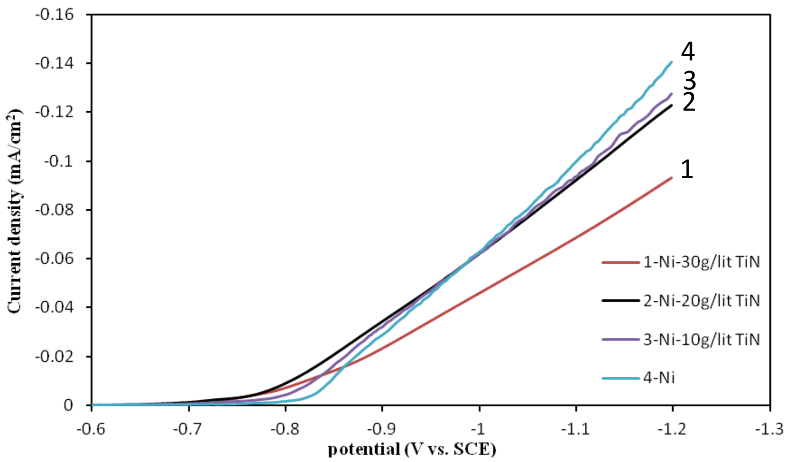


شکل ۷ درصد حجمی نانوذرات نیترید تیتانیم در پوشش ماده‌ی مرکب بر حسب سرعت تلاطم محلول

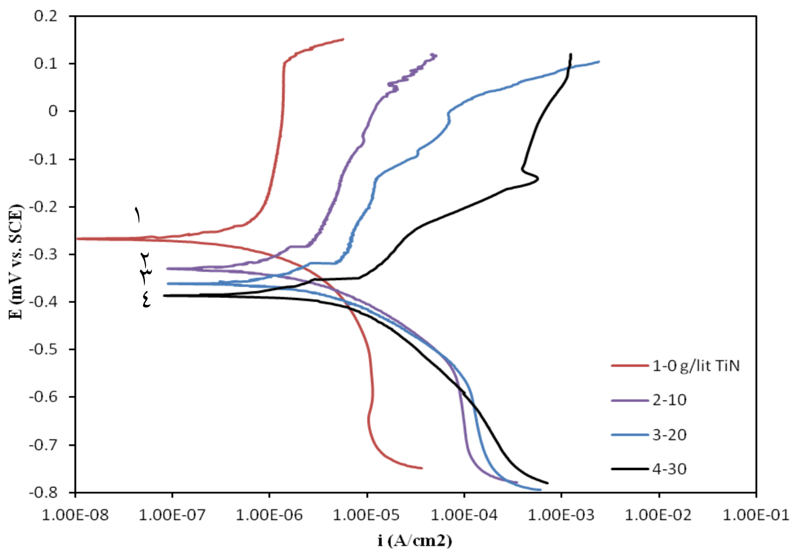


شکل ۸ درصد حجمی نانوذرات نیترید تیتانیم در پوشش ماده‌ی مرکب بر حسب غلظت ذرات در الکترولیت

شکل (۱۰)، نمودارهای پلاریزاسیون پتانسیودینامیک مربوط به پوشش‌های ماده‌ی مرکب نیکل- نیترید تیتانیم را در غلظت‌های مختلف ذرات در الکترولیت نشان می‌دهد. نتایج حاصل از این نمودارها، در جدول (۲) خلاصه شده‌اند. همان‌طور که در این نمودارها مشاهده می‌شود، پوشش نیکل خالص در مقایسه با پوشش‌های ماده‌ی مرکب، پتانسیل خوردگی مثبت‌تر و جریان خوردگی کم‌تری دارد. نتایج را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که در اثر حضور ذرات در پوشش ماده‌ی مرکب، محل‌های مناسب برای جوانه‌زنی پوشش نیکل بیش‌تر می‌شود و اندازه‌ی دانه‌ی نیکل کاهش و سطح مرز دانه‌ها افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، با حضور ذرات در پوشش، سطح پوشش زبرتر می‌شود و در نتیجه، سرعت خوردگی افزایش می‌یابد. افزون بر این، ذرات نیترید تیتانیم به‌دلیل رسانایی الکتریکی نسبتاً خوب، ریزپیل‌های گالوانیک در سطح پوشش نیکل تشکیل می‌دهند که منجر به افزایش چگالی جریان خوردگی می‌شود.



شکل ۹ نمودارهای ولتامتری خطی برای نیکل خالص و نانومواد مرکب نیکل- نیترید تیتانیم با سرعت روبش 1 mV/sec.



شکل ۱۰ نمودارهای پلاریزاسیون پتانسیودینامیک مربوط به پوشش‌های ماده‌ی مرکب Ni-TiN در غلظت‌های مختلف ذرات در محلول ۳/۵ درصد کلرید سدیم

جدول ۲ نتایج حاصل از نمودارهای پلاریزاسیون پتانسیودینامیک مربوط به پوشش‌های ماده‌ی مرکب در غلظت‌های مختلف

غلظت ذرات در حمّام (g/lit)	E_{corr} (mVvs. SCE)	i_{corr} (μA/cm^2)
0	-269	0/33
10	-329	0/81
20	-361	0/88
30	-387	1

نتیجه‌گیری

۱- اثر چگالی جریان بر میزان حضور ذرات در پوشش نانوماده‌ی مرکب نیکل- نیترید تیتانیم بررسی شد و چگالی جریان بهینه برابر با 4 A/dm^2 تعیین شد. افزون بر این، مشخص شد که چگالی جریان و حضور ذرات بر مُرفولوژی پوشش تأثیر دارند و با افزایش چگالی جریان، اندازه‌ی دانه‌های نیکل در زمینه کاهش می‌یابد.

۲- اثر سرعت تلاطم الکترولیت بر پوشش‌های ماده‌ی مرکب بررسی و سرعت تلاطم بهینه برابر با 450 دور در دقیقه تعیین شد. در سرعت‌های تلاطم کم‌تر، سیّال قادر به رساندن همه‌ی ذرات به سطح کاتد نبود و در سرعت‌های تلاطم بیش‌تر، ذرات قبل از به‌دام افتادن در پوشش، از سطح کاتد دور شدند.

۳- در بررسی اثر غلظت ذرات در الکترولیت، مشخص شد که با افزایش غلظت ذرات تا 30 g/lit، میزان حضور ذرات در پوشش افزایش می‌یابد. در واقع، با افزایش غلظت ذرات در الکترولیت، رسیدن ذرات به سطح الکترود افزایش می‌یابد که موجب افزایش میزان حضور ذرات در رسوب می‌شود.

٤- نتایج آزمون پلاریزاسیون نشان دادند که پوشش نیکل خالص در مقایسه با پوشش‌های ماده‌ی مرکب، پتانسیل خوردگی مثبت‌تر و جریان خوردگی کم‌تری دارد.

مراجع

1. J. P. Celis, J. R. Roos, C. Buelens, "A Mathematical Model for the Electrolytic Codeposition of Particles with a Metallic Matrix", *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 134, pp. 1402-1408, (1987).
2. B. Tadeusz, W. Tadeusz, "Surface engineering of metals- Principles", *Equipment, Technology, CRC Press* LLC, (1999).
3. J.L. Stojak, J. Fransaer, J.B. Talbot, "Review of Electrocodeposition", *Adv. Electrochem. Sci. Eng.*, Vol. 7, pp. 193-209, (2002).
4. S.C. Tjong and H. Chen, "Nanocrystalline materials and coatings", *Materials Science & Engineering* , Vol. 45, pp. 1-88, (2004).
5. G. Parida , "Synthesis of Ultrafine Dispersed Coating by Electrodeposition in Metallurgical & Materials Engineering", M.S. thesis, Dept. Metallurgical & Materials Engineering, National Institute

of Technology, Rourkela, (2010).

6. X.B. Zhu, et.al., "Electrodeposition and corrosion behavior of nanostructured Ni-TiN composite films". *Trans. Nanferrous Met. Soc. China*, Vol.21, pp. 2216-2224, (2011).
7. C.T.J. Low, R.G.A. Wills , F.C. Walsh, "Electrodeposition of composite coatings contai ning nanoparticles in a metal deposit", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 201, pp. 371-383, (2006).
8. R. Aghababazadeh , et.al. "Synthesis and characterization of nanocrystalline titanium nitride powder from rutile and anatase as precursors", *Surface Science*, Vol. 601, pp. 2881-2885, (2007).
9. B. Reddy, "Advances in Nanocomposites - Synthesis, Characterization and Industrial Applications", Publisher: InTech, Vol. 43, pp. 503-522, (2011).
10. F. Hu, and K.C. Chan, "Deposition behaviour and morphology of Ni–SiC electro-composites under triangular waveform", *Applied Surface Science*, Vol. 243, pp. 251-258, (2005).
11. L. Shi, et.al., "Mechanical properties and wear and corrosion resistance of electrodeposited Ni–Co/SiC nanocomposite coating", *Applied Surface Science*, Vol.233, pp. 3591-3599, (2006).